



PEMODELAN SEMI EMPIRIK PERSAMAAN KARAKTER PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA

Tjukup Marnoto

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, UPN "Veteran"
Jln. SWK 104 Lingkar utara, Condong catur, Jogjakarta, Indonesia 55283.
tjukup@gmail.com

Abstract

Mathematical models for predicting the characteristics of photovoltaic (PV) have been developed. These characteristics are popularly expressed in the form of I-V curves that may be presented graphically or using equations. There exists many equations for calculating the photogenerated current I_L , saturated current I_0 , and a fitting-parameter a . The characteristics of PV using simulations and experiments on multi-crystalline modules have been conducted. To achieve this, an experimental PV system of two modules, arranged in series. The current, voltage temperatures of module data were recorded at various solar radiation levels. This paper then presents and discusses a set of new equations pertaining to a , I_L , I_0 . These results were expressed using graphs and equations with constant values and compared with those obtained from the experimental set-up. This set of equations could be used to predict performances and of a PV module using temperature and solar radiation data only.

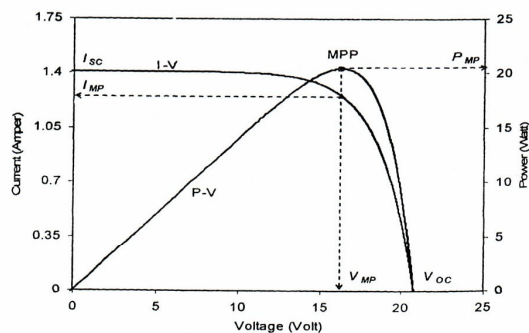
Keywords: photovoltaic; PV characteristic; mathematic model; PLTS

Pendahuluan

Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat merubah langsung sinar surya menjadi tenaga listrik. Kapasitas listrik yang tertera pada modul PLTS adalah kapasitas maksimum pada kondisi refference (1000 W/m², suhu 25 °C), kenyataannya di daerah tropis seperti Indonesia pada umumnya sukar mendapatkan kondisi tersebut, sehingga listrik yang dihasilkan selalu jauh dibawah kapasitas terpasang yang mengacu pada kapasitas tertera. Untuk mengatasi hal tersebut maka rancang bangun sistem energy menggunakan PLTS harus disesuaikan dengan kondisi setempat. Karakteristik PLTS diperlukan pada rancang bangun sistem energy menggunakan PLTS untuk memprediksi jumlah modul yang diperlukan sesuai kapasitas tenaga listrik yang diperlukan dengan merujuk kondisi setempat.

Persamaan karakteristik modul PLTS menyatakan hubungan arus dan voltase (I-V) dan atau power dan voltase (P-V), yang mana bisa dinyatakan dalam bentuk persamaan maupun grafik. Bentuk kurva karakter PLTS ditunjukan pada gambar 1. Didalam persamaan karakter PLTS mengandung parameter fitting (a), arus photon atau arus sinar (I_L) dan arus diode jenuh (I_0), yang dinyatakan sebagai persamaan parameter. Banyak bentuk-bentuk persamaan parameter yang diberikan oleh peneliti-peneliti terdahulu, pada umumnya persamaan tersebut memerlukan informasi

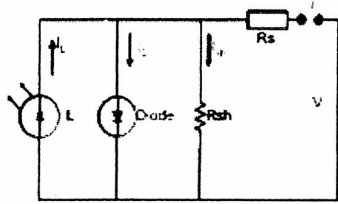
konstanta standard yang harus diketahui seperti konstanta Boltzmann, material band gap dan karakteristik PLTS pada kondisi referensi. Kebanyakan bentuk persamaan tersebut kompleks. (Duffie dan Beckman, 1991; Khauzam K. and Hoffman, 1996; Kou 1998; Ueda, 2004; Van Dyk dkk., 2005; Rosell & Ibanez, 2006). Pemodelan semiempirik pada penelitian ini mendapatkan persamaan yang lebih simpel dan tidak memerlukan banyak informasi PLTS pada kondisi referensi serta konstanta-konstanta standard seperti persamaan lainnya. Perbandingan persamaan ini dengan persamaan-persamaan yang telah ada merujuk dengan hasil eksperimen, serta kelebihanannya akan dijelaskan dalam makalah ini.



Gambar 1. Karakter I-V dan P-V modul PLTS.

Model Matematik

Model modul PLTS dapat disetarakan dengan suatu yang mengandung satu diode seperti ditunjukkan pada gambar 2 (Duffie dan Beckman, 1991).



Gambar 2. Sirkuit kesetaraan dengan PLTS.

Diagram neraca arus berdasarkan hukum Kirchhoff's akan didapatkan persamaan karakteristik arus-tegangan (I-V) dari modul PLTS, seperti dibawah:

$$I = I_L - I_D - I_{sh}$$

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V + I R_s}{a} \right) - 1 \right\} - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Tahanan shunt (R_{sh}) sangat besar dibandingkan tahanan seri (R_s), sehingga ruas kanan dari persamaan 1 sangat kecil dan dapat diabaikan, maka persamaan 1 menjadi lebih sederhana:

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V + I R_s}{a} \right) - 1 \right\} \quad (2)$$

Pada kondisi sirkuit tertutup, arus photon (I_L) setara dengan arus sirkuit tertutup ($I_L = I_{SC}$), dan pada kondisi sirkuit terbuka tidak ada arus yang melintas ($I=0$). Bila nilai 1 dapat diabaikan karena relatif kecil dibanding nilai bagian eksponensial maka dari persamaan 2 didapatkan persamaan I_0 sebagai berikut:

$$I_L = I_{SC} \quad \text{dan} \quad I_0 = I_L \exp \left(- \frac{V_{OC}}{a} \right) \quad (3)$$

Tahanan seri adalah tetap, sehingga pada kondisi power maksimum (I_{MP} , V_{MP}), dan substitusi persamaan 3 ke persamaan 2 didapatkan persamaan tahanan seri (R_s) seperti dibawah:

$$R_s = \frac{a \ln \left(1 - \frac{I_{MP}}{I_L} \right) - V_{MP} + V_{OC}}{I_{MP}} \quad (4)$$

Banyak peneliti-peneliti sebelumnya yang menggunakan persamaan 2 sebagai persamaan standard diantaranya yaitu Kou (1998), Ueda (2004), Van Dyk dkk. (2005), Kaushika (2005), Rosell & Ibanez (2006), tetapi untuk persamaan parameter a , I_L dan I_0 banyak bervariasi, seperti yang ditunjukkan pada table 1. Persamaan a , I_L dan I_0 hasil pemodelan semi empirik yang merujuk pada persamaan-persamaan sebelumnya dan data-data eksperimen adalah sebagai berikut:

$$a = k_1 T_C ; \quad I_L = k_2 G_T ; \quad I_0 = k_3 T_C^3 \cdot \exp \left(- \frac{k_4}{T_C} \right) \quad (5)$$

Substitusi persamaan 5 ke persamaan 2, didapatkan persamaan karakteristik PLTS seperti dibawah:

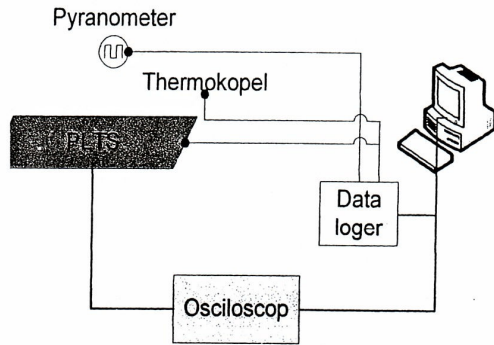
$$I = k_2 G_T - k_3 T_C^3 \exp \left(- \frac{k_4}{T_C} \right) \left\{ \exp \left(\frac{V + I R_s}{k_1 T_C} \right) - 1 \right\} \quad (6)$$

Metodologi

Penelitian ini dilakukan terhadap dua modul PLTS yang dipasang seri, dan beberapa sensor untuk mengukur suhu, arus listrik, voltase dan radiasi sinar surya. Skema susunan alat penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3. Pengukur radiasi matahari (pyranometer) dipasang berdampingan dengan PLTS. Termokopel pengukur suhu PLTS ditempelkan kepada bagian belakang PLTS sementara untuk mengukur suhu sekeliling dipasang didekat PLTS. Pyranometer dan termokopel di hubungkan dengan data logger untuk merubah data menjadi data digital yang selanjutnya direkam oleh komputer data. Arus dan voltase dari PLTS diukur dengan osciloscop yang dilengkapi tegangan geser otomatis serta dihubungkan dengan komputer perekam data. Pengambilan data PLTS dilakukan pada kondisi radiasi sinar surya dan suhu tertentu dengan perubahan beban secara otomatis sampai beban maksimum, kemudian perubahan arus maupun voltase dari PLTS yang terjadi direkam dalam komputer data. Demikian juga pengambilan data suhu PLTS dan suhu sekeliling dilakukan pada berbagai radiasi sinar surya.

Tabel 1. Persamaan-persamaan parameter a , I_L dan I_0 .

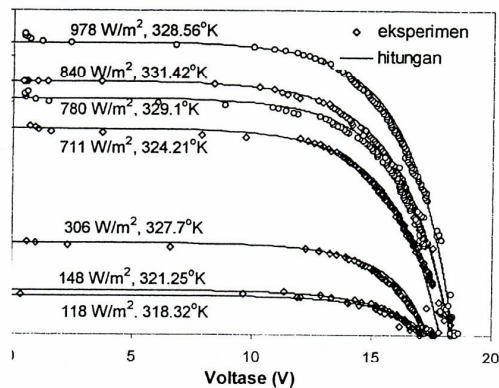
Arus photon (I_L)	Arus diode jenuh (I_0)	Parameter (a)	Pustaka
$I_L = \left(\frac{G_T}{G_{T,ref}} \right) \{ I_{L,ref} + \mu_{Lsc} (T_c - T_{C,ref}) \}$	$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{C,ref}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{N_s E_{GP}}{A} \right) \left(1 - \frac{T_{C,ref}}{T_c} \right) \right]$	$a = a_{ref} \frac{T_c}{T_{C,ref}}$	Duffie, and Beckman, 1991; Van Dyk, dkk. 2005.
$I_L = k_1 (1 + k_2 T_c) G_T S$	$I_0 = k_3 S T_c^3 \exp \left(- \frac{E_{GP}}{k_B T_c} \right)$		Kou, 1998.
$I_L = [(I_{L,0} + k_1 (T_c - k_2)) G_T]$	$I_0 = I_{0,ref} T_c^3 \exp \left(\frac{-E_{GP} \cdot q}{k_B T_c} \right)$		Khauzam and Hoffman, 1996.
$I_L = \beta I_{SC}$	$I_0 = \frac{\beta I_{SC} - (V_{OC} / R_{sh})}{e^{N_{ox}}}$		Ulleberg & Morner, 1997.
		$a = \frac{q}{k_1 k_B T_c}$	Bilgen, 2001.
$I_L = (k_1 + k_2 T_c) G_T$	$I_0 = k_3 S T_c^3 \exp \left(- \frac{E_{GP}}{k_B T_c} \right)$		Akkaya & Kulaksiz, 2004
$I_L = k_1 G_T$	$I_0 = I_{0,ref} T_c^3 \exp \left(\frac{-E_{GP} \cdot q}{k_B T_c} \right)$		Kaushika dkk., 2005.
$I_L = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_0 \left[\exp \left(\frac{I_{sc} R_s}{m V_t} \right) - 1 \right]$		$V_t = a = k_B T_c / q$	Rosell & Ibanez, 2006
$I_L = k_2 G_T$	$I_0 = k_3 T_c^3 \exp \left(- \frac{k_a}{T_c} \right)$	$a = k_1 T_c$	Penelitian ini



Gambar 3. Skema rangkaian alat penelitian

sil dan pembahasan

a hubungan antara arus dan voltase dari modul TS hasil eksperimen pada berbagai radiasi sinar ra dan suhu, digunakan untuk evaluasi nilai-nilai meter fitting (a), arus photon atau arus sinar (I_L) arus diode jenuh (I_0), dengan bantuan persamaan hasil evaluasi ditunjukkan pada tabel 2. Nilai-nilai meter (a), (I_L) dan (I_0) pada berbagai suhu dan sai sinar surya, digunakan untuk evaluasi nilai-i konstanta k_{1-4} . Evaluasi parameter dan stanta-konstanta dilakukan menggunakan metoda ke-Jeeves dengan minimasi jumlah kwadrat ulahan (SSE) antara data eksperimen dan hitungan. gan persamaan. Hasil evaluasi didapatkan nilai-i konstanta $k_1=0.0065$, $k_2=0.006$, $k_3=2858173$ $k_4=12960$. Gambar 4 menunjukkan bahwa andingan data I-V eksperimen dan hitungan gan persamaan 2 tidak jauh berbeda

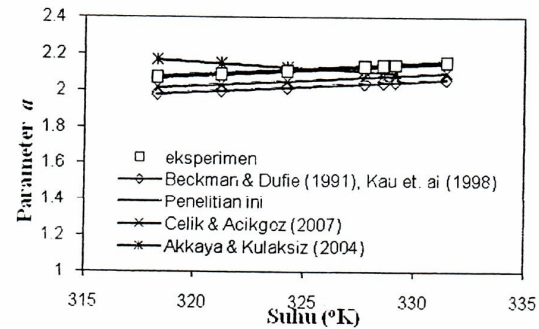


bar 4. Perbandingan karakteristik PLTS data rimen dan hitungan.

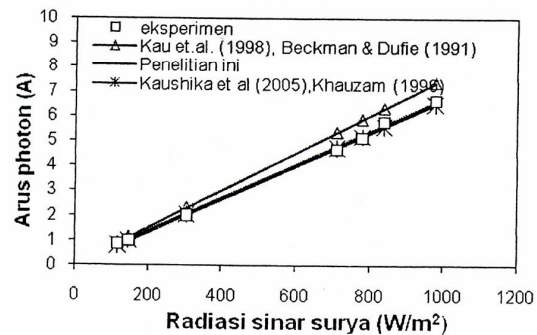
Tabel 2. Parameter fitting (a), arus photon (I_L) dan arus diode (I_0), pada berbagai suhu dan sinar surya.

G_T (W/m ²)	T_C (°K)	I_0 (A)	a (V)	I_L (A)
118.28	318.32	0.000185	2.0693	0.83591
148	321.25	0.000259	2.0883	0.9459
711	324.21	0.000391	2.1074	4.6198
306.62	327.7	0.000588	2.13	1.9648
978.57	328.56	0.000914	2.1356	6.60892
780	329.1	0.000973	2.1391	5.1069
840	331.42	0.001113	2.1542	5.7432

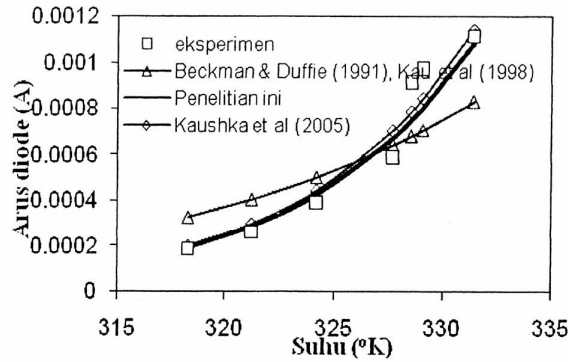
Perbandingan parameter fitting (a), arus photon (I_L) dan arus diode (I_0) hasil eksperimen dan hasil perhitungan dengan persamaan model yang diajukan dalam penelitian ini serta peneliti-peneliti sebelumnya ditunjukkan pada gambar 5 -7.



Gambar 5. Parameter (a) pada berbagai suhu.



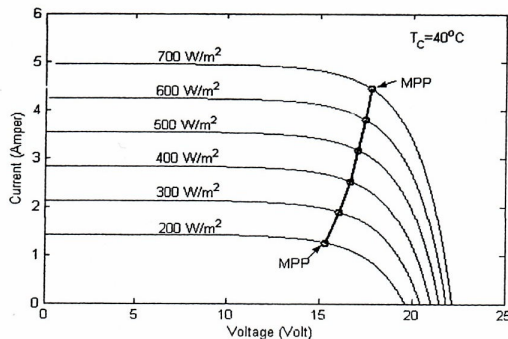
Gambar 6. Arus photon (I_L) pada berbagai radiasi sinar surya.



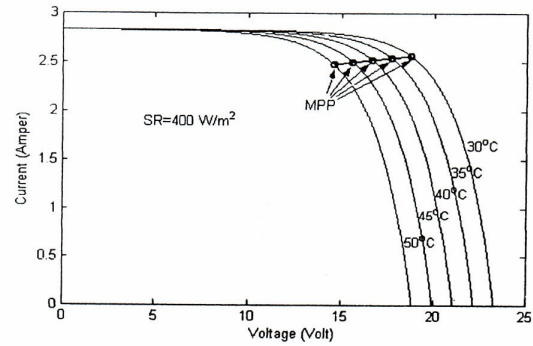
Gambar 7. Arus diode (I_D) pada berbagai suhu.

Gambar 5-7 menunjukkan bahwa data eksperimen dengan hasil perhitungan dengan persamaan penelitian ini maupun yang diajukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya, tidak jauh berbeda, bahkan hasil perhitungan dengan persamaan penelitian ini lebih dekat.

Duffie dan Beckman (1991) menyatakan bahwa karakter I-V dari modul yang dioperasikan pada kondisi suhu tetap dan radiasi sinar surya yang bervariasi adalah arus sirkuit tertutup (I_{sc}) meningkat sesuai dengan meningkatnya radiasi sinar surya. Sedangkan efek suhu terhadap karakter modul PLTS yaitu semakin tinggi suhu PLTS, voltase sirkuit terbuka semakin menurun dan perubahan arus sirkuit tertutup sangat kecil bahkan dapat dikatakan tidak berubah. Gambar 8 dan 9 menunjukkan bahwa karakter PLTS yang diprediksi dengan persamaan-persamaan penelitian ini adalah sesuai dengan pernyataan tersebut.



Gambar 8. Karakter I-V pada suhu tetap dan berbagai radiasi sinar surya.



Gambar 9. Karakter I-V pada radiasi sinar surya tetap dan berbagai suhu.

Merujuk uraian tersebut diatas dapat disimpulkan bahwa persamaan-persamaan parameter (a), arus photo (I_L), arus diode (I_D) yang diajukan dalam penelitian ini dapat digunakan dan lebih sederhana dibanding peneli sebelumnya, sehingga persamaan karakter modul PLTS menjadi lebih ringkas. Kelebihan lain dari persamaan ini yaitu tidak memerlukan informasi standar seperti konstanta Boltzmann, material band gap dan karakteristik PLTS pada kondisi referensi.

Kesimpulan

Persamaan-persamaan parameter fitting (a), arus photon (I_L), dan arus diode jenuh (I_D) pada penelitian ini adalah bentuknya lebih sederhana dibanding persamaan yang ada sebelumnya, sehingga persamaan karakter menjadi lebih ringkas dan dapat mewakili karakter modul PLTS. Nilai-nilai konstanta modul PLTS tipe multi kristal pada penelitian ini adalah $k_1 = 0.0065$, $k_2 = 0.006$, $k_3 = 2858173$, $k_4 = 12960$. Dengan nilai-nilai konstanta yang diketahui, persamaan-persamaan ini dapat untuk memprediksi kinerja dan keluaran listrik PLTS hanya dengan data radiasi sinar surya dan suhu PLTS. Nilai nilai konstanta pada penelitian ini dikhususkan untuk PLTS tipe multi kristal sedangkan untuk tipe lain perlu dilakukan penelitian lebih lanjut.

Daftar Notasi

- a = parameter fitting, V
- E_{GP} = band gap energy, eV.
- G_T = radiasi sinar surya, $W \cdot m^{-2}$
- I = arus PLTS, A
- I_L = arus photon/sinar, A
- I_D = arus diode, A
- I_O = arus diode jenuh, A
- I_{sh} = arus shunt, A
- I_{SC} = arus sirkuit tertutup, A
- I_{MP} = arus pada power maksimum, A

= konsanta, $V \cdot K^{-1}$
 = konsanta, $A \cdot m^2 \cdot W^{-1}$
 = konsanta, $A \cdot K^{-3}$
 = konsanta, $^{\circ}K$
 = konsanta Boltzmann
 = hambatan seri, Ohm
 = hambatan shunt, Ohm
 = muatan elektron, eV
 = luas PLTS, m^2
 = suhu PLTS, $^{\circ}K$
 = voltase PLTS, V
 = voltase sirkuit terbuka, V
 = voltase pada power maksimum, V
 = parameter voltase, V
 = parameter arus-suhu, $A \cdot K^{-1}$
 = parameter arus
 = referensi

Daftar Pustaka

- B., Yang, H., Shen, H. & Liao, X., 2003, Computer-aided design of PV/wind hybrid system, *Renewable Energy*, No. 28, 1491-1512.
- Ayaya, R. & Kulaksiz, A.A., 2004, A microcontroller-based stand-alone photovoltaic power system for residential appliances, *Applied Energy*, No. 78, 419-431.
- Chen, F., 2005, PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources, *Solar Energy*, No. 78, 661-669.
- Chen, E., 2001, Solar hydrogen from photovoltaic-electrolyzer systems, *Energy Conversion & Management*, No. 42, 1047-1057.
- Chen, A.N. & Acikgoz, N., 2007, Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models, *Applied Energy*, No. 84, 1-15.
- Chen, H.W. Li., Gary H.W. Cheung, Joseph C. Lam., 2005, Analysis of the operational performance and efficiency characteristic for photovoltaic system in Hong Kong, *Int. J. Energy Conversion and Management*, No. 46, 1107-1118.
- Chen, J.A. and Beckman, W.A., 1991, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd, Wiley Interscience, New York.
- Gxasheka A.R., Van Dyk E.E. and Meyer E.L., 2005, Technical note evaluation of performance parameters of PV modules deployed outdoors, *Int. J. Renewable Energy*, No. 30, 611-620.
- Kaushika, N.D., Gautam, N. K. & Kaushik, K., 2005, Simulation model for sizing of stand alone solar PV system with interconnected array, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, No. 85, 499-519.
- Khauzam K. and Hoffman K., 1996 Real Time Simulation Photovoltaic Modules, *Int. J. Solar Energy*, No. 56, 521-526.
- Kolhe M., Agbossou K., Hamelin J., Bose T.K., 2005, Analytical model for predicting the performance of photovoltaic array coupled with a wind turbine in a stand-alone renewable energy system based on hydrogen, *Int. J. Renewable Energy*, No. 28, 727-742.
- Kou, Q., Klein, S.A. & Beckman, W.A., 1998, "A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems, *Solar Energy*, No. 64, 33-40.
- Quaschnig V., 2004, *Technology fundamentals photovoltaic systems*, First published renewable energy world, Science publisher Ltd, New York.
- Rosell, J.I. & Ibanez, M., 2006, Modeling power output in photovoltaic modules for outdoor operating conditions, *Energy Conversion and Management*, No. 47, 2424-2430.
- Tjukup Marnoto, Kamaruzzaman Sopian, Wan Ramli Wan Daud & Sulaiman Shaari, 2006, Generalized Equations for Determining the Characteristics of Crystalline Photovoltaic Modules, *Proceeding International Symposium & Exhibition on Sustainable Energy & Environment, ISESEE 2006*, Kuala Lumpur, Malaysia. 389 - 400.
- Ueda K., Takano I., and Sawada Y., 2004, Maximum Power Point Tracking Control of Plural Array PV System Under Non-uniform Insolation Conditions, *Int. Proceedings of World Renewable Energy Congress VIII (WREC 2004)*, Elsevier Ltd.
- Ulleberg, Ø. & Morner S.O., 1997, TRNSYS simulation models for solar-hydrogen systems", *Solar Energy*, No. 59, 271-279.
- Van Dyk E.E., Gxasheka A.R., Meyer E.L., 2005, Technical Note Monitoring current-voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules, *Int. J. Renewable Energy*, No. 30, 399-411.